

卫星定位与导航系列丛书

简明导航系统教程

• 富立 王玲玲 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

卫星定位与导航系列丛书

简明导航系统教程

富 立 王玲玲 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书系统地介绍了导航系统的发展现状、工作原理及组合方式等方面内容, 简明易懂地诠释了惯性导航系统和组合导航系统的构架及实现方式, 通过实例再现了各类导航系统的组合过程。全书共 8 章, 主要内容包括导航与导航系统的含义、导航基础知识、平台惯性导航系统及其误差分析、捷联惯性导航系统及其初始对准、卫星导航系统及组合导航系统。

本书注重将导航系统的理论与工程实践相结合, 既可作为推广普及导航系统的技术读物和培训教材, 也可作为有关专业本科生和研究生的教学用书或参考书。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

简明导航系统教程 / 富立, 王玲玲编著. —北京: 电子工业出版社, 2017.6

(卫星定位与导航系列丛书)

ISBN 978-7-121-31512-1

I. ①简… II. ①富… ②王… III. ①卫星导航—导航系统—高等学校—教材 IV. ①TN967.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 090087 号

策划编辑: 宋 梅

责任编辑: 宋 梅

印 刷: 北京京师印务有限公司

装 订: 北京京师印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×980 1/16 印张: 10.75 字数: 204 千字

版 次: 2017 年 6 月第 1 版

印 次: 2017 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 49.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: mariams@phei.com.cn。

出版说明

对定位和导航的需求伴随着人类文明的发展史,进入 21 世纪以来,人类社会对这种需求却从未像今天这样迫切。定位和导航技术在国防和军事上的重要性不言而喻,同时在民用领域也已经展现了巨大的应用前景和广阔的商业市场,势必在不远的将来改变我们每个人的思维方式和生活习惯。随着现代科学技术的发展,尤其是通信、航天和半导体技术的飞速发展,基于卫星的无线电导航系统已经成为目前主流的定位和导航系统的系统架构。目前,全世界已经投入运行的卫星定位和导航系统有美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS 以及欧盟的伽利略系统和中国的北斗卫星导航系统。从系统构成的角度分析,基于卫星的定位和导航系统主要由空间卫星网络、地面控制中心和用户终端构成;从技术的角度分析,卫星定位和导航系统包括卫星姿态控制、卫星通信、原子钟技术、控制理论、微电子技术、系统状态参数估计和测绘测量等诸多现代科技分支。总体而言,基于卫星的定位和导航系统是现代科技多分支的有机结合,体现了一个国家的综合技术实力,是当前世界大国和主要利益集团之间竞相发展和竞争的热点科技领域。

在这样的背景下,为了推进我国卫星定位和导航技术的快速发展,同时共享世界上已经成熟的相关理论和应用,我们携手业界知名专家和相关技术人员,借鉴了在学术界和工业界都已经成熟的卫星定位和导航理论,注重实际经验的总结与提炼,策划出版了这套面向 21 世纪的“卫星定位与导航系列丛书”。本套丛书中除了有国内专家、学者创作的技术专著外,还包括我们精挑细选从国外引进的一些精品图书。丛书的著译者都是当今站在卫星定位和导航技术前沿的专家、学者及相关技术人员,丛书凝聚了他们在理论研究和实践工作中的大量经验和体会,以及电子工业出版社编辑的心血和汗水。丛书立足于卫星定位和导航系统中所涉及的前沿和成熟技术,以实用性、工具性、可读性强为特色,注重读者在实际工作和学习中关心的问题,涵盖了从初学者到具有一定水平的工程技术人员和学术研究人员不同需求,对卫星定位和导航技术的基本概念、多学科的技术细节和实现,以及未来技术展望进行了深入浅出的翔实论述。其宗旨是将卫星定

位和导航技术中最实用的知识、最经典的技术应用奉献给业界的广大读者，使读者通过阅读本套丛书得到某种启示，在日常工作中有所借鉴。

本套丛书的读者定位于卫星定位和导航相关产业的工程技术人员、技术管理人员，高等院校相关专业的高年级本科生、研究生，以及所有对卫星定位和导航技术感兴趣的人。

在本套丛书的编辑出版过程中，我们得到了业界许多专家、学者的鼎力相助，丛书的著译者为之付出了大量的心血，对此，我们表示衷心感谢！同时，也热诚欢迎广大读者对本套丛书提出宝贵意见和建议，或推荐其他优秀的选题（E-mail: mariams@phei.com.cn），以帮助我们在未来的日子里，为广大读者及时推出更多、更好的卫星定位和导航技术类优秀图书。

电子工业出版社

前 言

本教程将导航系统的理论与工程实践相结合,针对导航系统学习中遇到的问题,用通俗易懂的语言简明扼要地进行论述。本书既可作为有关专业本科生和研究生的教学用书或参考书,也可作为推广普及导航系统的技术读物和培训教材。

导航系统是用于引导运载体由出发点安全准确到达目的地的重要手段,是传感器技术、计算机技术、导航技术、信息处理技术等高度融合的产物。作为运载体运动过程中的“眼睛”,时刻精准地描述了“在哪儿”的问题。然而在多数人的眼中,导航系统似乎是神秘不可知的黑匣子。为了让更多的感兴趣者或者学习者充分地了解导航系统,本书以此作为编写宗旨,结合工程实践和多年的教学经验,以基础知识和基本原理为主,简单明了、突出重点地阐述不同类型的导航系统,并以实例形式进行总结。

全书共8章,第1章在对导航和导航系统概括性释义基础上,介绍了导航系统的分类及其发展情况;第2章主要阐述与导航系统设计有关的基础知识,重点分析了与地球相关的模型和参数,以及导航系统的基石“坐标系及其坐标变换”;第3~6章分析了以自主式惯性导航系统为代表的方方面面,其中,第3、4章主要介绍了平台惯性导航系统及其误差分析,在此基础上,第5、6章重点讨论了捷联惯性导航系统及其初始对准过程;第7章描述了以GPS为代表的卫星导航系统的基本原理及发展情况;第8章介绍了以捷联惯性导航系统和卫星导航系统为对象的组合导航系统,紧密跟踪国内外研究情况,重点阐述了不同组合模式的异同,并引入组合导航定位系统实例,用案例给出了组合导航系统的“分析—设计—验证”全过程。

全书由两位作者共同编写,第2~4章和第7章由富立编写,第1、5~6、8章由王玲玲编写。教研组全体研究生参与了全书的校验和审核,富立完成统稿工作。

本教材配有教学资源PPT课件,如有需要,请登录电子工业出版社华信教育资源网(www.hxedu.com.cn),注册后免费下载。

限于作者水平,书中难免出现不妥和错误之处,欢迎各位读者热心批评指正,以便本书逐步完善。

编 著 者

2017年4月于北京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 导航与导航系统含义	1
1.2 导航系统分类	3
1.2.1 基于获取导航信息方式的分类情况	3
1.2.2 基于确定导航信息方式的分类情况	4
1.2.3 与应用对象有关的分类情况	4
1.3 导航系统发展与应用	5
1.3.1 惯性导航系统发展与应用	5
1.3.2 卫星导航系统发展与应用	7
1.3.3 其他新型导航系统发展	8
1.3.4 组合导航系统发展	10
1.4 导航系统性能评价指标	11
第 2 章 导航的基本知识	15
2.1 概述	15
2.2 地球的几何形状与重力场	15
2.2.1 地球的形状描述	15
2.2.2 垂线、纬度和高度定义	17
2.2.3 参考椭球的曲率半径	18
2.2.4 地球的重力场	23
2.3 导航中常用坐标系	24
2.4 地球导航定位方法	27
2.4.1 基于参考椭球的定位方法	27
2.4.2 定位参数间的变换	28
2.5 坐标变换	29
2.5.1 方位余弦构造法	29

2.5.2 欧拉角构造法	30
2.5.3 坐标系之间的变换	32
2.5.4 坐标变换矩阵微分方程	36
2.6 导航系统基本力学编排方程	40
练习题	42
第 3 章 平台惯性导航系统	43
3.1 概述	43
3.2 舒拉摆及其在惯导系统中的实现	43
3.3 惯性平台	45
3.3.1 单轴惯性平台	45
3.3.2 三环三轴惯性平台	48
3.3.3 四环三轴惯性平台	50
3.4 平台惯导标准力学编排	52
3.4.1 指北方位力学编排方程	52
3.4.2 游动方位力学编排	54
3.5 平台惯导垂直通道阻尼	58
练习题	61
第 4 章 惯性导航系统误差分析	63
4.1 概述	63
4.2 惯导系统误差方程	64
4.2.1 位置误差方程	64
4.2.2 速度误差方程	65
4.2.3 姿态误差方程	67
练习题	72
第 5 章 捷联惯性导航系统	73
5.1 概述	73
5.2 捷联惯性导航系统基本原理	74
5.2.1 捷联惯导系统指北方位力学编排方程	74
5.2.2 捷联惯导系统游动方位力学编排	76

5.2.3 平台惯导系统和捷联惯导系统的比较	77
5.3 捷联惯性导航系统姿态表示方法	78
5.3.1 四元数法	78
5.4 捷联惯性导航系统计算	86
练习题	97
第 6 章 捷联惯性导航系统的初始对准	99
6.1 概述	99
6.2 粗对准方法	99
6.3 卡尔曼滤波技术简介	102
6.4 精对准方法	104
练习题	107
第 7 章 卫星导航系统	109
7.1 概述	109
7.2 GPS 的组成与特点	109
7.3 GPS 的基本定位原理	112
7.3.1 伪码定位原理	112
7.3.2 差分 GPS 工作原理	114
7.3.3 载波相位测量原理	115
7.3.4 GPS 定位算法	116
7.4 几何误差系数及最佳导航星选择方法	119
7.4.1 几何误差系数描述	119
7.4.2 最佳星座的选择	120
7.5 GPS 误差分析和误差模型	121
练习题	125
第 8 章 组合导航系统	127
8.1 概述	127
8.2 GPS/INS 组合导航系统	127
8.2.1 松散组合模式	128
8.2.2 紧密组合模式	129

8.2.3	不同组合模式综合比较与发展	130
8.2.4	组合卡尔曼滤波器	134
8.3	GPS/DRS 组合导航定位系统实例	136
8.3.1	航迹推算系统简介	136
8.3.2	GPS/DRS 组合导航定位系统结构	138
8.3.3	GPS/DRS 组合导航定位系统误差分析	139
8.3.4	组合导航滤波器的设计与实现	142
8.3.5	GPS/DRS 组合导航定位系统实验验证	146
8.4	MIMU/MR/GPS 组合导航系统实例	149
8.4.1	MIMU/MR/GPS 组合导航结构	149
8.4.2	MIMU/MR/GPS 组合导航子滤波器设计	151
8.4.3	MIMU/MR/GPS 组合导航系统动态测试	154
	练习题	158
	参考文献	159

第1章 绪 论

1.1 导航与导航系统含义

什么是导航？导航的提出与人类政治、经济和军事活动的需求密不可分。据传，在古代的涿鹿大战中，指南车的应用为黄帝部落与蚩尤部落之战的取胜提供了保证；在古代丝绸之路茫茫大漠中，骆驼队长途跋涉过程中在日月星辰、太阳等指引下明确了前进方向，从而顺利到达目的地；古代海上商业活动、中国郑和下西洋、近代海湾战争、车辆行驶或自动驾驶、船舶航行、手机定位、飞行器安全飞行等都离不开导航。由此可见，对于人类而言，导航是人类生产生活必不可少的信息技术，是实现航空、航海、航天、陆地交通过程中需要解决的基本问题。导航是一个技术门类的总称，可以定义为引导飞机、军舰、车辆、个体等运动体从出发点安全准确地沿着所选定的路线准时到达目的地的航行过程。导航示意图如图 1.1 所示。

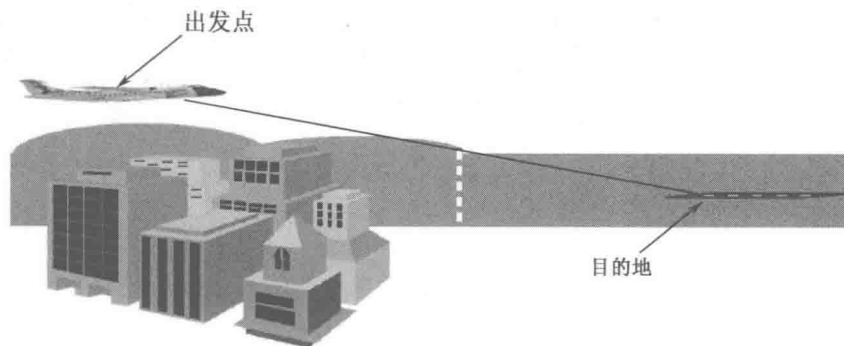


图 1.1 导航过程示意图

如何实现导航过程？可利用导航系统完成运动体的系列引导任务。所谓导航系统就是可以正确提供载体运动过程中位置、速度、姿态角等航行参数的导航设备或装置。利用导航系统，可以使得驾驶员或者自动驾驶仪在陌生环境中操纵运载体正确地向着

目的地前进。以机载导航系统为例进行说明,机上的多种导航系统如图 1.2 所示。一般而言,导航设备有指示状态和控制状态两种工作状态。指示状态,可以简单地理解为导航参数的直观显示,此时导航设备不直接参与对载体的控制,而是驾驶人员根据导航设备提供的载体运动参数等信息自行控制载体航行。控制状态下,导航设备的导航信息直接提供给自动驾驶系统,在人为参与较少氛围下自动控制载体按照预定的航线航行。



图 1.2 机载多种导航设备

以飞机的飞行为例具体说明部分导航参数。为了保证飞机的安全飞行,需要实时提供飞机飞行过程中的最基本导航参数,主要包括机体的即时位置、速度和航向姿态信息。早期飞机上测量导航参数的仪表多为机械式的导航仪表,随着测量技术、传感器技术、计算机技术的日趋完善,目前机上用于测量导航参数的设备升级为导航系统。机载导航系统通过一系列复杂的算法可以实时计算飞机的即时位置、速度和航向姿态信息,与计算机中存储的飞机路径中各航路点位置信息相结合,就可以计算出修正飞机航行偏差以及表征正确航向的指导参数(如飞机航迹角、偏航距和待飞距离、待飞时间等)。机上不同的导航系统相组合还可以计算出航迹角误差、真航向、航迹角、偏流角和地

速等参数。有关上述部分导航参数的示意如图 1.3 所示。

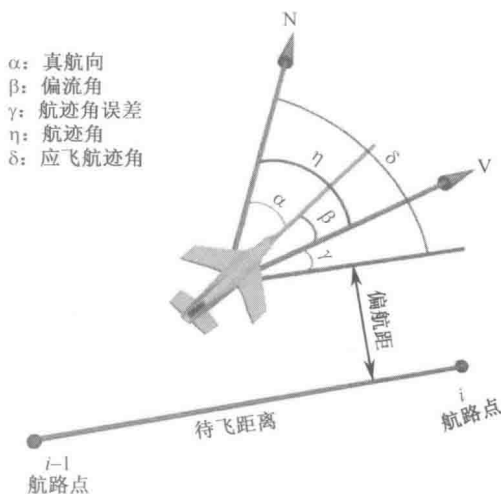


图 1.3 飞机导航参数示意图

1.2 导航系统分类

根据不同标准或要求,导航系统有不同的分类形式。可以根据获取导航信息方式、确定导航信息方式、导航系统应用对象等对导航系统进行分类。

1.2.1 基于获取导航信息方式的分类情况

不同导航系统依据不同的物理原理确定载体导航参数。依据导航系统获取导航信息方式,可将其分为自主式导航系统和非自主式导航系统。自主式导航系统利用安装在运载体上的设备可单独产生或感知与导航参数相关的测量信息,如惯性导航系统、地磁导航系统、视觉导航系统、地形匹配导航系统等。

非自主式导航系统又被称为无线电导航系统,其与自主式导航系统的重要区别在于,除了需要装在运载体上的导航设备或装置之外,还需要在其他地方设置相关设备(即导航台)与之配合才能产生导航信息。导航台与运载体上的导航设备通过无线电波联系形成的导航系统称作陆基导航系统(如塔康导航系统、无线电信标系统等)。导航台设在人造地球卫星上便形成卫星导航系统。然而,不论是哪种形式的非自主式导航系

统，其显著的缺点就是信号易被干扰。

1.2.2 基于确定导航信息方式的分类情况

基于确定导航信息方式的不同可将导航系统分为定位系统和推算导航系统。定位系统是指导航信息确定与过去测量值无关的系统，主要包括无线电导航系统、天文导航系统和地形辅助导航系统。例如，无线电导航系统根据已接收的无线电信号，计算运载体运动中相对坐标位置已知的导航台坐标，从而得到导航坐标系内运载体的位置。在此基础上，通过多普勒频移或位置信息获得运载体的速度。推算导航系统通过从起始时间开始的连续测量值获得相关导航信息，如惯性导航系统、多普勒导航系统等。惯性导航系统相关实现原理后续详述。

1.2.3 与应用对象有关的分类情况

从应用对象角度而言，导航系统可分为军事导航系统和民用导航系统。军事导航系统可提供较完备的军事航行服务，并为正确执行任务所需的军事操作提供帮助。例如，对于空军而言，飞机在执行各类复杂任务时必须从基地起飞，在导航系统指引下沿着指定航线准时到达目的空域，执行完任务后返回出发点或飞向指定的机场着陆；对于海军而言，舰队出海执行任务时有出港、中途航行与返回停泊的过程，茫茫大海上完成任何一个环节都离不开导航系统的引导。利用军事航行服务下的导航信息可以协助完成作战操作任务。如预警飞机在执行任务过程中，需要实施跟踪运动目标，然而机上雷达系统在机体振动、机体机动等因素影响下，基于雷达的目标检测结果可信度降低，此时需要借助机载导航系统提供的飞机实时姿态、速度、位置信息，才能探测出目标位置。正是如此，导航系统成为各类武器装备乃至提升部队战斗力的重要组成部分。一般而言，军事领域导航系统的抗干扰能力、保密性、导航信息的多样性、系统精度等性能指标远高于其他领域的导航系统。

民用导航系统是综合考虑安全性和经济效益条件下面向民用领域开放的导航系统。由于与军事领域航行所执行的任务十分类似，因此两种系统在本质上并未截然分开，甚至相互之间交联影响。由纯粹的军事需要而发展起来的导航系统，可以演变为军民合用导航系统；民用导航系统在经济和导航信息多途径保障方面都有独特的优势，往往装备于军事运载体。两者之间的区别见表 1.1。在军事和民用需求的牵引和技术发展的推动下，新式导航系统将不断引入，旧式导航系统将逐渐被淘汰。

表 1.1 军事领域导航与民用领域导航的区别

	航线	服务区域	指标特殊要求
民用领域导航	固定	交通线	安全性高、经济成本低
军事领域导航	非固定	无限制	抗干扰、防欺骗、多样性、保密性等

1.3 导航系统发展与应用

1.3.1 惯性导航系统发展与应用

随着惯性技术及传感器技术的不断发展, 惯性导航系统 (Inertial Navigation System-INS) 应运而生。惯性导航系统是依据牛顿惯性原理的自主式导航系统, 一般由惯性传感器 (陀螺和加速度计) 和导航信息处理计算机等单元组成, 由于其完全依靠载体自身携带的设备感知运动变化情况, 不与外界发生任何声、光、电、磁的联系, 具有自主性强、隐蔽性好、实时性高和全天候工作等优点, 在各种运载体的导航、制导、定位和稳定控制中获得了广泛应用, 成为飞行载体的核心导航部件。

根据系统内部结构的不同, 可将惯性导航系统分为平台惯性导航系统和捷联惯性导航系统。20 世纪 80 年代以前所用的都是平台式惯性导航系统。其典型特征就是将陀螺和加速度计直接安装在机械的稳定平台上。具体而言, 首先以陀螺为基础形成不随载体姿态和位置而变动的物理型稳定平台, 以便始终保持指向固定方向的导航坐标系, 输出飞行载体相对导航坐标系的三维角度信息。然后, 对固定在平台上加速度计的测量信息分别进行一次积分和两次积分过程, 从而得到载体的速度和位置信息。目前的平台式惯性导航系统定位精度为 $0.5 \sim 1.5 \text{ nmile/h}$, 飞行前的准备时间较长, 大概需要 $8 \sim 15 \text{ min}$ 。在长达 30 多年的时间里, 平台式惯性导航系统长时间一直都是载体安全飞行必不可少的主要导航系统, 许多国家在此期间关注平台系统的改进, 以及与之相应的气浮、液浮、静电悬浮等惯性仪表的研究。然而, 由于其体积大、结构复杂、维护成本高等诸多问题, 目前逐渐向捷联惯性导航系统过渡。

电子技术、计算机技术、传感器技术、纳米技术的快速发展, 促进了挠性陀螺、激光陀螺、光纤陀螺、微机电陀螺、石英加速度计等低成本中等精度惯性仪表的广泛应用。

于是,低成本的捷联惯性导航系统正在逐渐取代平台惯性导航系统。捷联惯性导航系统与平台惯性导航系统最大的不同在于,捷联惯性导航系统的惯性传感器直接固联在运动载体上,利用数学平台代替物理平台,基本原理与平台惯性导航系统类似,但具有结构简单、可靠性较高、便于维护等诸多优点,因此成为当前及此后自主式导航系统发展的重心。

目前,国外发展惯性导航技术的国家主要包括美国、俄罗斯、英国、法国、德国、日本以及部分欧洲国家等,国内研制捷联惯性导航系统的单位有 618 所、33 所、哈尔滨工业大学、北京航空航天大学等多个科研院所及机构。据有关资料报道,1984 年以前的美军军用导航系统全部为平台惯性导航系统,1989 年就有一半改为了捷联惯性导航系统,五年后捷联惯性导航系统使用率上升至 90%。然而,由于捷联惯性导航系统的惯性传感器与运载体直接相连,所处的工作环境可想而知,除了敏感载体的运动信息外,还有敏感载体的过载、冲击、振动以及其他各种干扰。因此,在利用陀螺测量信息构建数学平台时,在惯性敏感元件及其运动环境之间的互相影响下,容易造成数学平台动态误差乃至其他导航信息动态误差。此外,为了进一步提高新型捷联惯性仪表的精度,需在加工工艺、材料、光电元器件等各方面大量投入。客观地讲,捷联惯性导航系统的精度目前还未达到平台惯性导航系统的精度水平,不能完全满足各种军用和民用的要求。

惯性导航系统因不依赖于外界导航台和电波的传播,具有自主性强、隐蔽性好、抗干扰能力强、系统更新率高等优点,在军用和民用诸多领域得到了广泛的应用。由于惯性导航在航空、航海、航天领域有不可替代的作用,受到了各军事大国的青睐和关注。20 世纪 60 年代初,空军开始将机载惯性导航系统装备于军用飞机,然而由于当时受模拟计算机性能以及陀螺研究情况的限制,只有在少数飞机上初步装备。20 世纪 70 年代,随着数字计算机及宽体飞机技术的高速发展,加之越南战争及其他战事的刺激,机载惯性导航系统作为重点进入大发展时期,先后在大多数军用飞机和大型民航机上安装了平台式惯性导航系统。同样,在 60 年代初,在舰船和弹道导弹技术发展的推动下,美国海军开始在军舰、核潜艇上大量装备惯性导航系统,用来为舰只导航并为舰炮的垂直和方位基准提供舰载导弹的位置、速度和方位信息。进入 21 世纪以来,惯性技术特别是陀螺技术由传统的机电陀螺阶段,发展到以激光陀螺、光纤陀螺为代表的光学陀螺阶段,且随着精密机械、微电子学、纳米技术、半导体集成电路工艺等技术的进步,低成本微机电惯性仪表迅速兴起。预计到 2020 年,基于光学陀螺的捷联惯性导航系统将在战略级领域占主导地位,而基于微机电陀螺的捷联惯性导航系统将成为导航及战术级领域的主体。我国一直高度重视惯性技术及导航技术的研究,从“六五”开始就

把惯性导航相关技术作为国防预研关键问题纳入到信息化建设系统中,并投入大量经费推动惯性导航系统的重点建设,已研制的惯性仪表及系统,在人载卫星、运载火箭、飞机、舰艇上得到了广泛应用。

1.3.2 卫星导航系统发展与应用

导航卫星系统是以人造卫星作为导航台的非自主式导航系统。20 世纪 50 年代末,人造卫星的成功发射为卫星导航系统的发展奠定了良好基础。美国研制的 Transit 系统可看作第一代卫星导航系统。之后,美国于 70 年代在美国国防部的支持下开始研制第二代卫星导航系统,即我们熟知的全球导航系统 GPS (Global Positioning System-GPS)。经过十余年的研究过程,1993 年底 GPS 达到初始工作能力,两年后该系统达到全运行能力。在整个 GPS 构架中,在距地球表面上空 20 200 km 和 19 100 km 的圆形轨道布满 24 颗卫星,如图 1.4 所示。

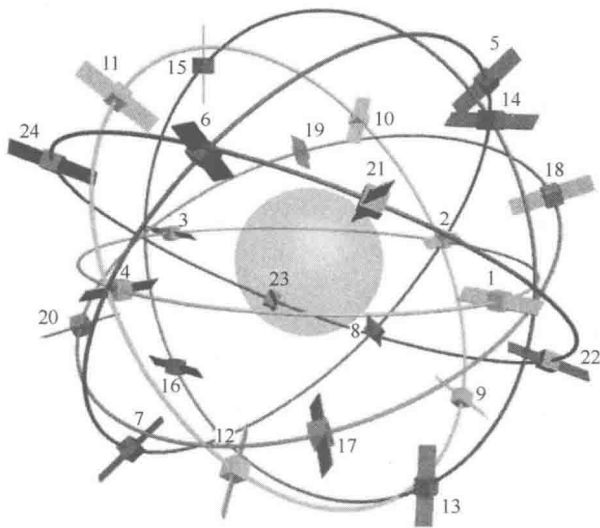


图 1.4 GPS 卫星导航系统示意图

因此,位于地球上的任何位置,任何时候都可以至少看到 5 颗卫星,最多可以看到 11 颗,从而解算得到用户的准确位置和精准时间。目前,运行轨道中的卫星采用的是携带原子频标的 GPS 卫星。

为了与美国在卫星导航领域的霸主地位相抗衡,苏联于 1976 年开始发展 GLONASS 卫星导航系统,该系统也由卫星星座、地面支持系统和用户设备三部分组成。标准配置